

文章编号:1671-8879(2015)02-0067-08

山区道路弯坡组合路段重载车辆行驶速度模型

徐 进^{1,2}, 邵毅明¹, 赵 军³, 杨 奎³

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;
3. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘 要:为解决山区复杂公路三维空间线形条件下的重型车辆运行速度预测问题,提出了一种新的弯坡组合路段运行速度建模思路并给出了实现技术。以基于平面和横断面要素的运行速度曲线作为纵坡路段的期望速度;同时,在加速度模型中引入单位质量比功率来反映货车动力性能差异和荷载情况;再通过加速性能使用系数和速度敏感性阈值来描述驾驶行为差异性;最后,以 2 条直坡道和 2 条复杂山区公路作为算例。研究结果表明:模型能够预测出坡道任意位置的速度值,用其可以得到车速降低/升高至某一值时的行驶距离,从而能够对临界坡长进行控制;能够体现平面线形的影响,借助该模型能够实现对复杂山区公路空间线形的综合评价。

关键词:道路工程;长大纵坡;弯坡组合路段;货车运行速度;行驶速度;空间线形;三维设计
中图分类号:U412.33;U461.1 **文献标志码:**A

Speed perdition model of heavy truck driving on curved segment with a slope of mountainous highway

XU Jin^{1,2}, SHAO Yi-ming¹, ZHAO Jun³, YANG Kui³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China;
3. School of Transportation and Logistic, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: To predict the operating speed of heavy trucks in three dimensional alignment when it's driving on complex mountain highways, this paper presented a new method for predicting the speed of truck driving on curves with slopes. The operating speed based on horizontal curve and cross section was used as the target speed; weight-to-net-horsepower ratio was introduced into longitudinal acceleration model to reflect the difference of truck dynamic perforce and its load; utilization factor of acceleration and threshold value of speed sensibility were selected to reflect differentiation of driver behavior; at last, two straight grade and two complex mountainous highways were selected as the simulation examples. The results show that: the models in this paper can predict the speed of a truck at arbitrary position of a given grade; by using the speed model, the distance that truck traveled at velocity from design speed up/down to a certain value can be determined so as to control the critical length of grade. Furthermore, because the effect of

收稿日期:2014-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51278514);交通运输部应用基础研究(主干学科)项目(2015319814050);

重庆市科技计划项目(cstc2014jcyjA30024);“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG01B01,2014BAG01B06)

作者简介:徐 进(1977-),男,吉林四平人,重庆交通大学副教授,工学博士,中铁二院工程集团有限责任公司博士后,

E-mail:yhnl_996699@163.com。

horizontal curves is considered, the synthetical evaluation of 3D alignment of complex mountainous highways can be conducted. 9 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; large longitudinal grade; curve with slop; truck operating speed; speed; 3D alignment; 3D design

0 引言

纵断面设计一直是山区公路设计的一项重要工作,由于地表的自然坡度远远超过汽车能够正常行驶的坡度界限,需要通过延伸线路里程以把纵面坡度降低至汽车行驶所容许的范围内,但这必然会导致复杂的线形组合以及线路的曲折迂回;而直接在设计点用大半径曲线或是直线进行切割,又会导致巨大的圬工量和结构物数量,对自然环境造成破坏的同时又会产生巨额的工程费用。因此,需要在平、纵和横面之间进行精细、巧妙的平衡。

设计出满足汽车行驶要求、驾驶预期和驾驶习惯的公路线形是设计者必须遵守的原则。小客车、大客车和大货车是目前公路上最典型的 3 种车辆形式。小客车由于质量轻,动力性能在 3 种车型中最优,最高车速可达 250 m/h 以上,但实际行驶速度是由路面附着系数和轨迹平面曲率所限制,而受坡度和坡长的影响很小甚至不受影响。大型货车的驱动力虽然最大,但单位质量比功率最低,上坡行驶时,在坡道阻力的作用下车速会逐渐降低然后达到一个稳定的爬坡速度 V_G 。坡度值越大, V_G 越低,但显然不允许过低的 V_G ,因为会使快速行驶的车辆受到严重阻碍,降低通行能力和服务水平。因此,设计规范对上坡方向的最低允许速度以及临界坡长做出了明确限制,在设计纵断面时若上坡路段长度大于临界坡长,则要调整设计高程或是设置爬坡车道^[1-2]。大货车下坡时,坡道方向的重力分量会超过轮胎滚动阻力,在巨大的惯性下速度会持续上升,驾驶人为了控制车速将会频繁制动,刹车衬片的温度将持续升高,车辆的可控性下降,事故发生概率将大大增加,因此需要对坡长、坡度以及连续下坡范围内的平曲线进行控制。为此,应建立纵坡路段大货车运行速度预测模型,以得到纵坡路段的货车行驶速度曲线,从而帮助设计者判断纵断面设计是否需要调整,是否需要设置爬坡车道,弯坡组合位置是否存在安全性问题等。

根据建模手段以及数据来源,现有的纵坡路段运行速度模型可分为 3 类:第 1 类是基于数据回归的统计模型,如《公路项目安全性评价指南》给出了

平曲线单元的 V_{85} 统计模型,当曲线路段位于纵坡上时根据坡度值对速度进行修正^[3]。Gibreel 等建立的小客车弯坡组合路段 V_{85} 模型包含了较多的纵断面因素等,比如竖曲线半径、坡度差等^[4];许金良等根据纵坡路段的速度观测数据建立了坡顶、坡中和坡底 3 个断面的速度预测模型^[5-6]。第 2 类是将汽车行驶受力进行分解,然后建立纵坡路段的汽车行驶方程式,对其进行解算即可得到某一时间点的行驶速度。荣建的模型是其中比较有影响力的一种,该模型的核心是引入了单位质量比功率 P_q ,对模型方程式进行迭代解算即可得到每一仿真步长对应的纵坡速度值^[7];钟小明等建立了 P_q 随坡长坡度变化的回归公式,进一步完善了这一模型体系^[8];符铎等针对高速路公纵坡路段建立了基于行驶动力学理论的货车运行车速预测模型,可用于山区高速公路的线形设计安全性评价^[9];雷斌等也使用类似方法建立了高速公路重载汽车运行速度预测模型^[10]。第 3 类是使用各种启发式算法作为建模手段,如 Taylor 采用神经网络方法来预测高速公路有维修作业情况下的运行速度,模型的输入数据包括平面、纵断面、横断面要素,以及交通控制方面的因素如速度限制、交通信号等^[11]。尽管国内外学者开展了大量研究工作,但仍存在以下不足:

(1)目前统计模型的模型系数是固定的,无法反映出载重货车不同车型之间悬殊的动力性能差异;并且,中国不同功能的公路/桥梁的设计荷载是不同的,因此针对不同类型公路进行预测时,代表车型应该有所区别。

(2)使用目前的模型仅能计算出一些特征断面的行驶速度,比如坡顶、坡中和坡底,显然无法刻画出汽车在数公里甚至数十公里连续纵坡上的速度变化特征,因此很难实现对纵断面设计的评价和调整,以及对爬坡/避险车道位置的精确控制。

(3)坡长较短时,汽车驶过短坡之后速度会有恢复;而连续长下/上坡时,大型货车的动力储备不足会导致速度持续下降或是连续性上升。统计模型由于没有包含汽车动力性能参数,无法反映出这种连续坡道对行驶速度衰减的累积作用。

(4)下坡、平坡和缓坡行驶时,不同驾驶人的行

为模式会表现出比较明显差异,在车辆操纵层面上这种差异性体现为使用多大比例的加速储备和制动能力,而目前的模型没有体现出这种差异。

(5)目前的模型是假设车辆在直坡上行驶,但实际上山区公路的纵坡路段范围内会包含连续多个平曲线,发动机输出功率的一部分要用于克服横向加速度,必然会影响汽车行驶速度;与此同时,当平曲线临界速度低于纵坡速度时,驾驶人为了避免侧翻或是侧滑必须要把车速调低至临界速度之下,因此平曲线对运行速度影响极大。

由于以上的种种缺陷,现有的大货车速度模型在进行山区公路纵坡路段或是三维空间线形速度预测时会失效。为此,本文提出了一种新的纵坡路段运行速度预测模型,具体的建模思路为:①将平面线形运行速度作为期望速度;②将单位质量比功率 P_q 作为核心建模参数;③考虑驾驶行为的差异性。最后,以几条山区公路为算例对模型进行了验证。

1 基于平面和横断面的期望速度计算

本文开发了2种方法来求解基于平面和横断面的行驶速度,分别是优化决策方法和统计模型方法。使用前一种方法时先是决策出典型驾驶模式的行驶轨迹及其曲率,然后根据轨迹曲率来优化典型驾驶模式的行驶速度,此种方法贴近真实驾驶行为,适用于车辆闭环仿真,但需要循环迭代计算,求解时间随着问题规模的扩大而迅速增加。相比之下,统计模型方法由于具有明确的代数表达式,计算过程非常迅速;并且本文所提出的模型已经过试验验证,精度能够满足要求。但与以往运行速度统计模型不同的是,本文在模型中引入了平曲线转角影响因子和路幅宽度影响因子,这样一来,转角以及路幅宽度对行驶速度的影响便得以体现。关于建模思路、数据来源以及建模过程的详细阐述,可以参阅文献[12],在此仅给出模型表达式形式,具体如下

$$V_C = 3.6 \sqrt{a_{y\text{tol}} R \lambda_A \lambda_w} \quad (1)$$

其中

$$a_{y\text{tol}} = 0.30 + \frac{3\ 500}{R^{1.220} + 1\ 850} \quad (2)$$

$$\lambda_w = \begin{cases} 1 + (\lambda_{w1} - 1)\lambda_{w2}, & \lambda_{w1} \geq 1 \\ 1 - (1 - \lambda_{w1})\lambda_{w2}, & \lambda_{w1} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_{w1} = 0.087\ 2W_{DL} + 0.720\ 5 \quad (4)$$

$$\lambda_{w2} = \left(0.687 + \frac{489.726}{12.291R - 11.836} \right)^{1.5} \quad (5)$$

$$\lambda_A = \begin{cases} 1 + (\lambda_{A1} - 1)\lambda_{A2}, & \lambda_{A1} \geq 1 \\ 1 - (1 - \lambda_{A1})\lambda_{A2}, & \lambda_{A1} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{A1} = \begin{cases} \left(\frac{0.45(A_{cr} + 15)}{A - 6} \right)^{0.3} + 0.125, & A < A_{cr} \\ \left(\frac{0.45(A_{cr} + 15)}{A_{cr} - 6} \right)^{0.3} + 0.125, & A \geq A_{cr} \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{A2} = \frac{305.82}{R + 114.06} - 0.1 \quad (8)$$

$$A_{cr} = 85 - 0.11R \quad (9)$$

式中: V_C 为弯道运行速度; $a_{y\text{tol}}$ 为侧向容许加速度; λ_w 为路幅宽度影响因子; λ_A 为转角影响因子; λ_{w1} 、 λ_{w2} 、 λ_{A1} 、 λ_{A2} 为模型的中间变量; W_{DL} 为可供驾驶人适用的路幅宽度; A 为平曲线转角; A_{cr} 是平曲线临界转角,即只有在低于 A_{cr} 时 A 的改变才会对运行速度有影响; R 为平曲线半径。

λ_w 用来描述路幅宽度对驾驶人速度选择行为的影响,如图1所示。路幅越宽,驾驶人自由选择行驶轨迹的机会越充分,而大多数驾驶人都会选择“切弯”模式(即进弯时从弯道外侧切入弯道内侧,驶出时再切回外侧),这样一来轨迹曲率可以得到有效的舒缓,因此在维持原有侧向舒适水平的情况下,驾驶人可以选择更高的行驶速度以节省过弯时间。

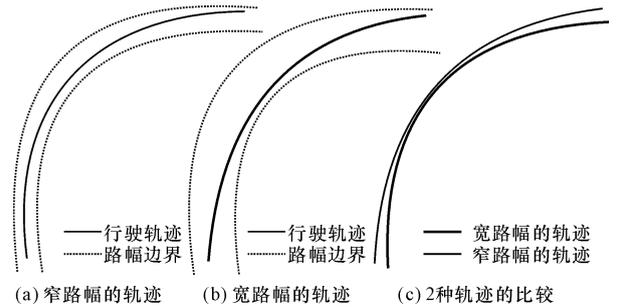


图1 路幅宽度对行驶轨迹的影响

Fig. 1 Effect of roadway width on trajectory

λ_A 用来描述平曲线转角对驾驶人速度选择行为的影响。在实际行驶中这种影响也是通过影响行车轨迹来体现的,如下页图2所示,转角越小,弯道对轨迹的约束作用越小,驾驶人“切弯”时轨迹曲率的舒缓效果越明显,因此驾驶人能够选择更高的行驶速度。

任意里程路段上的速度曲线计算过程为:①根据公路的平面线形参数和横断面参数和车型,计算出路段的最高行驶速度 V_{max} ;②根据公路类型和车型,用式(2)计算出 $a_{y\text{tol}}$;③将路幅宽度 W_{DL} 和平曲线转角 A 代入式(3)和式(6),得到 λ_A 和 λ_w ;④将 $a_{y\text{tol}}$ 、 λ_A 和 λ_w 二者带入式(1),得到修正后的弯道运行速度 V_C 值,如下页图3(a)所示;⑤分别计算出减速起点和加速终点(减速终点是HY点,加速起点是YH点),如果相邻的曲线间隔较近,需要计算出

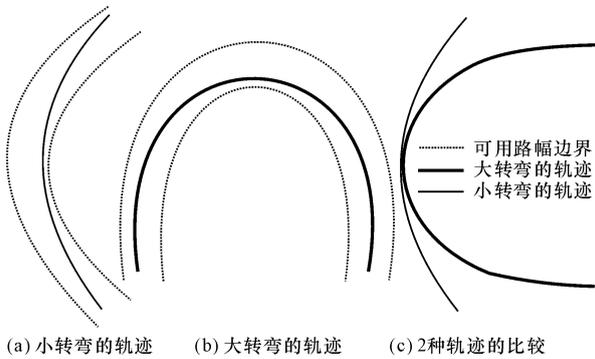
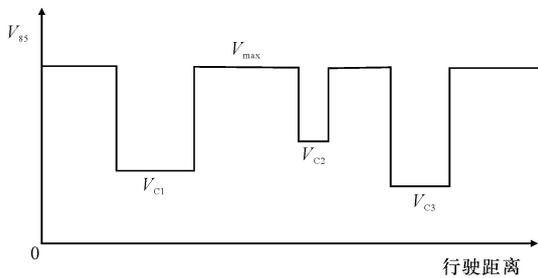
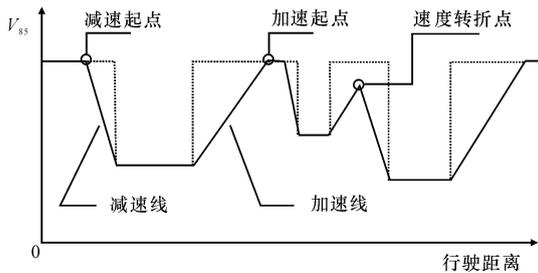


图2 曲线转角对行驶轨迹的影响

Fig. 2 Effect of deflection angle on trajectory



(a) 最高速度及弯道速度计算



(b) 运行速度变化点的确定

图3 平曲线运行速度的计算示意

Fig. 3 Illustration of calculating the operating speed of horizontal curves

加速线和减速线的交点;⑥用线段连接相邻的速度特征点,即可得沿行驶方向变化的 V_{85} 曲线,见图3(b)。

2 货车纵坡路段行驶速度解算模型

上节给出了基于平面线形和横断面的运行速度计算模型,用其可以得到沿行驶方向变化的速度曲线作为货车行驶时的目标速度,那么,货车在弯坡组合路段的实际行驶速度实质上可以看作是汽车在实际动力性能限制下跟踪目标速度的结果。在行驶过程中,驾驶人在每一个仿真步的初始时刻比较出实际速度与目标速度之间的差值,如果二者的差值超过了可接受阈值,驾驶人则对当前的车辆运动状态进行调整。

在实际速度和预期速度给定的情况下,汽车沿路线行驶方向的运动行为可用纵向加速度 a_x 唯一

的确定,因此,纵坡行驶速度模型的关键就是建立起 a_x 与行驶环境和汽车状态之间的关系。本文使用AASHTO(美国道路运输协会)提出的等效纵向加速度公式来计算 a_x ^[12-13],具体模型形式为

$$a_x = \frac{3.05a_h}{10 + (1.5a_h/|a_h|)(a_h - a_c)}, V_i < 12 \text{ km/h} \quad (10)$$

$$a_x = \frac{0.122V_i a_h}{0.4V_i + (1.5a_h/|a_h|)(a_h - a_c)}, V_i \geq 12 \text{ km/h} \quad (11)$$

$$a_h = \frac{0.305a_c + 4\ 687.27\eta / (P_q V_i)}{1 + 14\ 080 / (P_q V_i^2)} \quad (12)$$

$$a_c = 0.074\ 57 - 0.000\ 122V_i - \frac{0.006\ 4\xi V_i^2}{f_a} - \frac{67.89\eta}{P_q V_i} - 2.989G_i \quad (13)$$

$$\eta = 1 - 0.000\ 012\ 2H_a \quad (14)$$

$$\xi = (1 - 0.000\ 002\ 1H_a)^{4.225} \quad (15)$$

式中: a_h 为汽车发动机输出功率所能提供的最大加速度; a_c 为上坡或下坡换挡期间车辆滑行时的加速度; V_i 为第 i 个仿真步长开始时刻的车辆初速度; P_q 为车辆的单位质量比功率; f_a 为车辆的风阻系数; ξ 为大气压力的海拔高度修正系数; η 为不同海拔高度空气含氧量变化对发动机输出功率影响的修正系数,发动机为汽油机时按式(14)计算,柴油机时 $\eta=1$; G_i 为汽车所在位置的纵坡坡度值; H_a 为汽车行驶位置的海拔高度值。

3 弯坡路段货车行驶速度求解算法

本文采用等步长求解方式来完成车辆在弯坡组合路段上的实时行驶速度解算,假设仿真步长为 τ ,那么每隔时间 τ 更新一次车辆位置、速度和加速度,仿真结束后可得到许多数据点,可根据数据点绘制“速度-行驶距离”连续曲线,或是“加速度-行驶距离”连续曲线,从而对纵坡路段行驶质量和设计安全性进行评价。仿真开始前需要准备的数据包括道路平纵横设计资料、仿真车型、发动机型式等。以下是具体的计算方法和步骤。

步骤1:指定仿真初始参数,包括 P_q, f_a, H_0 和发动机类型;其中 P_q 在30~125 kg/745.7w范围内取值,载质量越大,取值越靠近底限; f_a 在230~920 kg/m范围内取值, H_0 为汽车初始位置的海拔高度值;此外还需指定仿真初速度 V_0 。

步骤2:导入公路设计要素,包括平曲线、纵面和横断面要素,然后指定设计速度、车道数、车道宽度、路肩宽度以及路拱度等参数。

步骤 3:根据平曲线和横断面要素值,解析计算出公路中线以及两侧路缘线的位置坐标;预测出基于平面和横断面的运行速度曲线作为期望速度,保存成 $\{L_{ci}, V_{di}\}$ 格式的数据,其中 L_{ci} 为里程值, V_{di} 为 L_{ci} 位置的期望速度值。

步骤 4:根据纵断面要素值(坡度、坡长、竖曲线半径、切线长),按一定间距解析计算出公路的纵面设计标高,得到 $\{L_{ci}, H_i, G_{di}\}$ 格式的数据, H_i 为 L_{ci} 位置的设计标高, G_{di} 为 L_{ci} 位置的坡度值,根据这些数据可以绘制“坡度-里程”曲线和“设计标高-里程”曲线。

步骤 5:计算车辆实时位置的路面纵向坡度值 G_j 和海拔高度值 H_{aj} ,假设车辆在仿真步长起始时刻的已行驶距离为 L_{gj} ,然后查询出 L_{gj} 在标高数据中的里程位置,如果 $L_{ci} \leq L_{gj} < L_{ci+1}$,实时位置坡度 G_j 和海拔高度 H_{aj} 的计算式为

$$G_j = G_{di} + (G_{di+1} - G_{di})(L_{gi} - L_{ci}) / (L_{ci+1} - L_{ci}) \quad (16)$$

$$H_{aj} = H_0 + (H_{i+1} - H_i)(L_{gi} - L_{ci}) / (L_{ci+1} - L_{ci}) \quad (17)$$

步骤 6:根据输入数据以及 G_j 、 H_{aj} 计算值,计算车辆的实时纵向加速度 a_{xj} 。

步骤 7:计算车辆实时速度 V_{j+1} ,其中 κ_a 为发动机功率使用系数,当坡度 G_j 大于 2% 时 $\kappa_a = 1$,当 G_j 小于 2% 时, κ_a 可以在 0.70~0.95 之间选择。

$$V_{j+1} = V_j + \kappa_a a_{xj} \tau \quad (18)$$

步骤 8:计算车辆所在点位的期望速度,由于实际行驶位置 L_{gj} 与事先计算的平曲线运行速度数据中的 L_{ci} 不一定正好相等,更常见的情况是 L_{gj} 落在 $L_{ci} \sim L_{ci+1}$ 区间内,因此需插值计算出 L_{gj} 对应的目标速度值 V_{cj}

$$V_{cj} = V_{ci} + (V_{ci+1} - V_{ci})(L_{gi} - L_{ci}) / (L_{ci+1} - L_{ci}) \quad (19)$$

步骤 9:计算速度 V_j 与期望速度 V_{cj} 之间的差值 ΔV ,如果 $\Delta V \leq v_c / \tau$,驾驶人仍维持原来的速度, v_c 为驾驶人对行驶速度敏感性的阈值,即

$$V_{j+1} = V_{cj} \quad (20)$$

如果 $\Delta V > v_c / \tau$,且 $V_{cj} > V_j$,则 $V_{j+1} = V_j + v_c + 0.05(V_{cj} - V_j)$

如果 $\Delta V > v_c / \tau$,且 $V_{cj} < V_j$,则

$$V_{j+1} = V_j - v_c \tau \quad (21)$$

那么,此时的加速度 $a_{xj} = (V_{j+1} - V_j) / \tau$ 。

步骤 10:计算出车辆在的实时位置,即货车的行驶里程为

$$L_{gj+1} = L_{gj} + V_j \tau + 0.5 a_{xj} \tau^2 \quad (22)$$

经过以上步骤,即可获得能够综合考虑空间线

形的“行驶速度-行驶距离”曲线,此外,还可以得到“加速度-行驶距离”曲线、“坡度-距离曲线”和“高差值-距离曲线”。

4 本文模型和算法的适用条件分析

受地形影响,平原公路的平曲线使用比例很低,线形平直,弯坡组合路段自然很少,现有的直坡行驶速度预测模型基本能够满足要求。相比之下,山岭地区公路基本是以曲线为主,几乎没有单纯的直坡路段,而弯坡组合路段是更普遍的纵坡路段存在形式。因此,从地形条件角度,本文模型更适合山岭重丘地区公路。

以车道数划分,山区公路目前主要包含双车道、4 车道和 6 车道 3 个类别。由于截然不同的公路沿线土地利用特征,平原地区常见的 4/6 车道的一级公路在山区更多的是以高速公路形式存在,并且设计速度普遍要比平原公路偏低,其中 4 车道高速公路的设计速度 V_d 一般为 80 km/h,而 6 车道高速公路的设计速度通常取 100 km/h。根据观测,大型重载货车(3 轴以上,总重超过 20 t)的最高行驶速度为 75~85 km/h。实测中发现当弯道半径高于 400~450 m 时,大型货车的速度不再受弯道半径影响,可以直接使用现有模型进行预测,而设计速度大于等于 100 km/h 的公路平曲线半径普遍大于 450 m。基于以上分析,本文的期望速度模型适用于山岭地区的双车道公路和设计速度为 80 km/h 的 4 车道高速公路,半径的临界值为 450 m。

本文将位于重丘或是山岭地区、设计速度不超过 80 km/h 的道路称为山区复杂道路,因为这类道路具有复杂的线形特征,曲率变化丰富,线形组合复杂、急弯、陡坡、连续弯道以及弯坡组合路段频繁出现,道路线形与驾驶人的驾驶行为以及车辆运动学行为之间具有很高的关联度和控制作用。

期望速度中的可使用路幅宽度包含车道宽度和其他可供驾驶人使用路面宽度,如右侧硬路肩和一部分对向车道宽度,根据不同类型公路的现场观测,山区双车道公路的可使用路幅宽度为 3.50~5.25 m,高速公路由于线形条件好,驾驶行为更规范,货车驾驶人常用路幅宽度基本为车道宽度,取值范围为 3.50~4.25 m。

本文第 2 节纵坡路段行驶速度预测模型的功能是对第 1 节计算出的期望速度进行跟随,由于不涉及平面线形要素以及横断面要素,此部分除了与第 1 节模型相组合来计算设计速度低于 80 km/h 的山

区道路空间线形货车运行速度之外,还可单独用于设计速度为 100 km/h 或 120 km/h 的高速公路,以及平原地区公路直坡路段的货车运行速度。当单独使用时,可以人为设定一个固定的期望速度值来替换第 3 节求解算法中的步骤 2、步骤 3。

5 纵坡路段货车行驶速度计算实例

用 4 个典型路段作为货车运行速度预测算例,1 个直坡、1 个交替上下坡和 2 条山区复杂路段。

5.1 直坡

先以 1 段直坡行驶为例进行计算,坡道的平面线形为一根直线,坡度为 5.5%,路段起点海拔高度为 3 000 m。图 4 是货车上坡行驶时的速度衰减曲线,根据图 4 可知,在给定的动力性能参数条件下,货车的稳定爬坡速度 V_G 为 55 km/h,在速度达到 V_G 之前,汽车行驶了 2 300 m。还可得到汽车从期望速度 80 km/h 降至某一个设定的允许速度 V_{min} (假设 $55 \text{ km/h} \leq V_{min} \leq 80 \text{ km/h}$) 的行驶距离 L_g ,设计人员使用 L_g 可以对临界坡长进行控制。

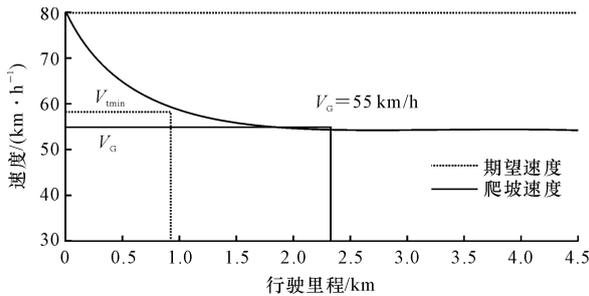


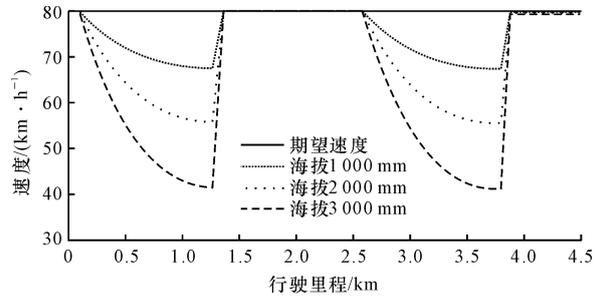
图 4 5.5%单直上坡时的货车行驶速度

Fig. 4 Operating speed of truck on a 5.5 percent uphill

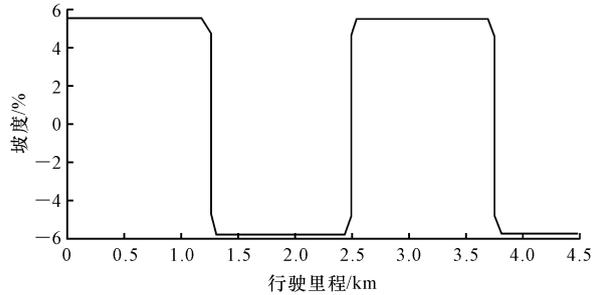
5.2 交替上下坡

图 5(a)是货车在一条 5.5%交替上下坡的直坡道的行驶速度算例(坡度值沿里程的变化见图 5(b)),其中最上面一条直线是期望速度,下面 3 条是假设道路位于不同海拔高度时的车辆行驶速度曲线(汽油发动机)。从图中能看到海拔越高,汽车上坡时的速度衰减越明显,因此设计人员进行公路纵断面设计时,必须考虑海拔高度对汽车行驶性能的重要影响。汽车速度在经历了上坡的衰减之后,当坡向变为下坡时开始恢复加速,直至达到 80 km/h 的期望速度。

在西南山区单纵坡路段几乎不存在,而弯坡组合是更普遍的形式,因此计算纵坡路段行驶速度必须考虑平面线形的耦合影响。选择四川省都江堰市郊的一段双车道公路作为算例,该道路设计速度



(a) 货车期望速度和爬坡速度

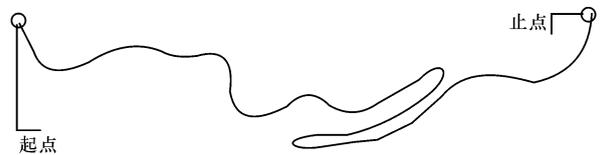


(b) 计算对象的坡度值变化

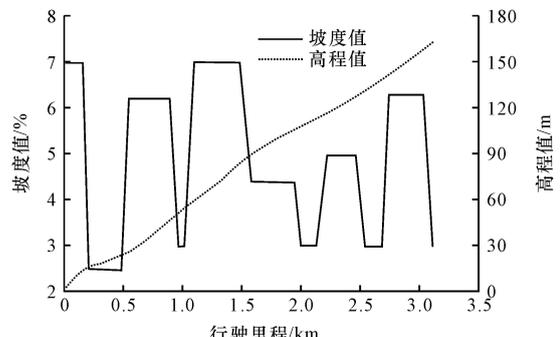
图 5 5.5%交替上坡下坡时的货车行驶速度

Fig. 5 Operating speed of truck on a longitudinal grade with ±5.5 percent gradient in turn

30 km/h,路宽 7 m,路线是沿岷江河谷两侧伸展,而岷江河道蜿蜒迂回,因此路段平面曲率变化丰富,线形复杂。下页图 6(a)是使用本文开发的三维路面计算程序得到的道路几何边界的平面坐标,能看到平面线形基本上是由平曲线构成,直道比例很小。图 6(b)是用本文算法得到的坡度值曲线和纵面高差曲线,能看到在起点至终点方向一直是上坡行驶,且陡坡与缓坡交替出现。



(a) 试验路段的平面线形



(b) 纵面高差和坡度值

图 6 试验道路的平纵面线形

Fig. 6 Horizontal/vertical alignment of test road

下页图 7 是货车的一组行驶速度曲线,包括期

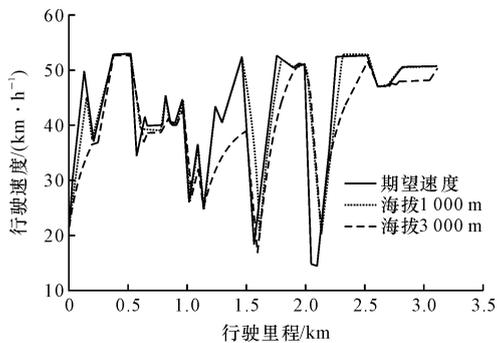


图 7 货车在试验路段上的运行速度

Fig. 7 Operating speed of truck on test road

望速度和 2 种不同海拔高度的行驶速度,其中 1 000 m 是实际海拔高度,3 000 m 是假设的海拔高度。从图 7 可看到海拔 1 000 m 时,实际的货车速度基本上能够追得上期望速度,二者之间的偏差不大。由于爬坡速度高于平曲线临界速度,平曲线的出现会导致行驶速度的频繁波动。而当海拔为 3 000 m 时,汽车动力性能严重下降,上坡加速能力和爬坡能力的弱化,导致爬坡速度低于平曲线临界速度,因此,汽车行驶速度对平曲线线形变化的敏感性变差。

以四川省 S217 甘孜—理塘的 K119+446.6~K132+541.7 段作为另一个实例,该公路沿雅砻江河谷展线,设计速度 30 km/h,起点海拔高度 3 014 m,是典型的高原公路。图 8(a)是计算得到的两侧路边线平面坐标,能看到平面线形虽有一定程度的蜿蜒,但总体上还算流畅。图 8(b)是纵面高差曲线,能看到公路纵面在标注区域内先是 1 000 m 的连续上坡,平均坡度 5.5%,然后是 1 500 m 的连续下坡,平均坡度 3.5%,高差起伏很大。

图 9 是使用本文模型计算得到的货车行驶速度,包括期望速度曲线和不同车型、不同装载情况的三维运行速度曲线。由于平面线形比较舒缓,在 13 km 的行驶里程内期望速度仅出现 7 处波动,而且仅有一处较大(位置 5,速差 10 km/h),其余 6 处的波动都是非常小甚至非常微弱的。而导致实际行驶速度(三维线形运行速度)发生明显波动的因素是高海拔和纵坡度,在这 2 个因素的双重作用下,货车三维运行速度曲线在标注区间内严重低于期望速度,尤其是在第一处,中型货车满载时的速度低于 30 km/h(设计速度),重型货车满载时的速度已经低于 20 km/h,超载 30% 时爬坡速度进一步下降至 15 km/h,与期望速度相比速度降幅高达 40 km/h。显然会严重阻碍行驶在其后的快速车辆比如小客车和轻型货车,因此宜设置爬坡车道或是通过交通工

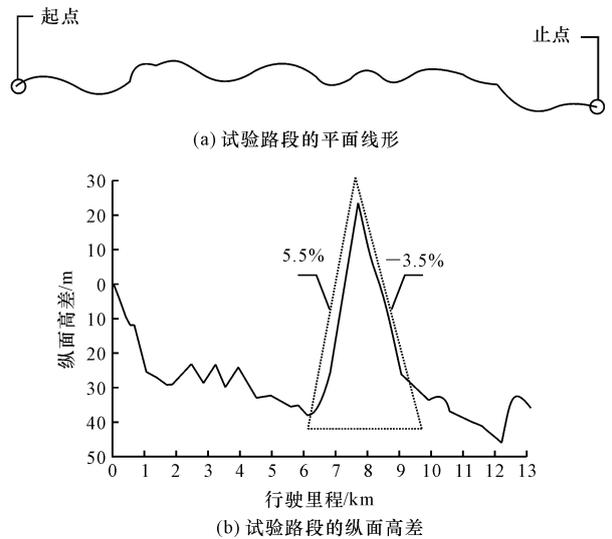


图 8 试验道路的平纵面线形

Fig. 8 Horizontal/vertical alignment of test road

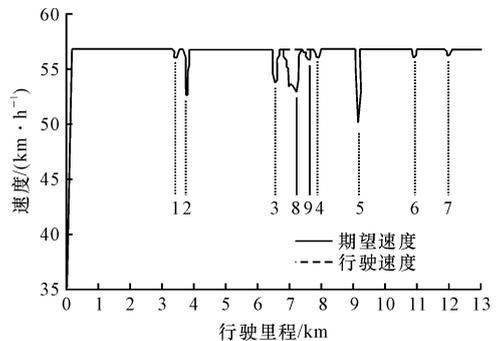


图 9 不同类型货车在试验路段的运行速度曲线

Fig. 9 Operating speed of different trucks on test road

程措施来保证此区段的通行能力。

6 结 语

(1) 纵断面设计质量直接决定了道路安全性、舒适性、经济性、通行能力和服务水平,而大货车在纵坡路段的运行速度是衡量以上指标的最直接参量。本文提出了一种新的弯坡路段运行速度建模方法,即先计算出基于平面和横断面线形的运行速度曲线,以其作为期望速度;然后引入单位质量比功率、风阻系数、含氧量来反映货车动力性能和海拔高度的影响;再通过加速性能使用系数和速度敏感性阈值来描述驾驶人行为差异性。

(2) 直坡道和山区复杂公路的算例表明,使用本文模型能够计算出连续坡道任意位置的速度值,可以得到速度降低/升高至某一值时的行驶距离,从而能够对临界坡长进行控制,并且能够将复杂平面线形对速度的影响体现进来,因此能计算出任意复杂线形、任意技术等级公路的运行速度曲线,从而能够

实现空间三维线形的综合评价。

(3)重型货车下坡时,驾驶人为了稳定行车速度,会频繁操作刹车踏板,导致制动器温度持续升高,当温度超过某一临界点时,制动器摩擦副的摩擦系数显著下降,制动性能将恶化。而本文的模型尚未考虑这一点,因此,下一步的研究重心将集中在制动器热衰退性能对货车下坡运行速度的影响方面。

参考文献:

References:

- [1] 梁国华,马荣国,沈翔,等.高速公路爬坡车道设置的有效性[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(1):23-30.
LIANG Guo-hua, MA Rong-guo, SHEN Xiang, et al. Effectiveness of building climbing lane on expressway [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2014, 34(1): 23-30. (in Chinese)
- [2] 董忠红,倪凤英,柳帅蒙,等.长大纵坡路段重型车辆爬坡速度[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(3):1-5.
DONG Zhong-hong, NI Feng-ying, LIU Shuai-meng, et al. Heavy truck climbing speed on long and steep longitudinal slope section[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2014, 34(3): 1-5. (in Chinese)
- [3] JTG/T B05—2004,公路项目安全性评价指南[S]. JTG/T B05—2004, Guideline for safety audit of highway[S]. (in Chinese)
- [4] Gibreel G M, Easa S M, El-Dimeery L A. Prediction of operating speed on three dimensional highway alignments[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 21-30.
- [5] 许金良,叶亚丽,苏英平,等.双车道二级公路纵坡段车辆运行速度预测模型[J].中国公路学报,2008,21(6):31-36.
XU Jin-liang, YEL Ya-li, SU Ying-ping, et al. Operating speed prediction model on gradient section for two lane secondary highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 31-36. (in Chinese)
- [6] 邓云潮.公路长大下坡路段小客车运行速度预测模型[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(4):43-47.
DENG Yun-chao. Speed prediction model of free-flowing passenger car on long and steep downgrades [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2010, 30(4): 43-47. (in Chinese)
- [7] 荣建.高速公路基本路段通行能力研究[D].北京:北京工业大学,1998.
RONG Jian. Capacity of basic expressway sections [D]. Beijing: Beijing university of technology, 1998. (in Chinese)
- [8] 钟小明,刘小明,荣建,等.基于高速公路路线设计一致性的中型卡车运行速度模型研究[J].公路交通科技,2005,22(3):92-96.
ZHONG Xiao-ming, LIU Xiao-ming, RONG Jian, et al. Research on operating speed models of free flowing truck for alignment design consistency of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 92-96. (in Chinese)
- [9] 符铎,高捷.高速公路纵坡路段货车运行车速预测[J].公路交通科技,2008,25(6):139-143.
FU Xin-sha, GAO Jie. Operating speed predicting model for trucks on freeway's longitudinal slope section[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 139-143. (in Chinese)
- [10] 雷斌,许金良,刘洁.长大上坡路段载重汽车运行速度预测模型[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(6):8-15.
LEI Bin, XU Jin-liang, LIU Jie. Heavy truck's climbing speed prediction model of long uphill section[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2013, 33(6): 8-15. (in Chinese)
- [11] Taylor D R, Muthiah S, Kulakowski B T, et al. Artificial neural network speed profile model for construction work zones on high-speed highways[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(3): 198-204.
- [12] 徐进,罗庆,毛嘉川,等.考虑弯道几何要素和交通量影响的汽车行驶速度预测模型[J].中国公路学报,2012,25(5):47-57.
XU Jin, LUO Qing, MAO Jia-chuan, et al. Speed prediction model of car/truck considering the effect of curve geometric features and traffic volume[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 47-57. (in Chinese)
- [13] Fitzpatrick K, Elefteriadou L, Harwood D W, et al. Speed prediction for two-lane rural highways [R]. Virginia: Federal Highway Administration, 2000.